

Beschreibung

Mehrwandige Nanoröhre sowie Verfahren zum Oxidieren nur der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhre

5

Die Erfindung schafft eine mehrwandige Nanoröhre, bei der nur die äußere Wand oxidiert ist und ein Verfahren zum Oxidieren nur der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhre.

10 Mehrwandige Nanoröhren sind aus [1] bekannt.

Ferner sind aus [1] Kohlenstoff-Nanoröhren sowie Verfahren zu deren Herstellung bekannt [1]. Eine typische mehrwandige Nanoröhre hat einen Durchmesser von mehreren 10 nm, wobei die
15 Länge einer Nanoröhre mehrere Mikrometer betragen kann. Die Enden einer Nanoröhre sind typischerweise mit jeweils einem halben Fullerenmolekülteil gekappt, d.h. abgedeckt.

Eine Nanoröhre kann sowohl einwandig als auch mehrwandig
20 sein. Bei mehrwandigen Nanoröhren ist mindestens eine innere Nanoröhre von einer äußeren Nanoröhre coaxial umgeben [1].

Je nach Chiralität weisen Nanoröhren entweder die Eigenschaften eines Metalls oder die Eigenschaften eines Halbleiters auf. Diese Leitfähigkeit kann weiterhin durch
25 Anlegen eines elektrischen Feldes (sogenannter Feldeffekt) [2] und/oder durch Dotieren der Kohlenstoff-Nanoröhre mit Bornitrid gesteuert werden, wie in [3] beschrieben. Im letzteren Falle spricht man bei einer mit Boratomen und
30 Stickstoffatomen dotierten Nanoröhre auch von einer Bor-Nitrid-Nanoröhre.

Wegen der Eignung der Nanoröhre als metallische Leiter sowie als Halbleiter ist es im Rahmen der Nanoschalttechnik
35 wünschenswert, solche einwandigen und mehrwandigen Nanoröhren auf festen Substraten aufzubringen.

Bislang wurde dies dadurch erreicht, dass ein Substrat zum Beispiel durch Behandlung mit Trialkyl-substituierten Silazanverbindungen hydrophob gemacht wurde, und die Nanoröhre anschließend aufgrund Van der Waalschen Kräfte darauf fixiert wurde [4]. Eine derartige Aufbringung führt jedoch zu der Möglichkeit, dass die Nanoröhre auf dem Substrat verrutschen kann. Dieses Verrutschen beeinträchtigt sowohl den gewünschten vorgegebenen Aufbau als auch die langfristige Beständigkeit solcher, mit Nanoröhren konstruierter Schaltkreise erheblich.

Ferner wird in [5] das chemische Funktionalisieren von Nanoröhren zu Zwecken deren Immobilisierung auf Substraten beschrieben, und das Immobilisieren von Nanoröhren auf Substraten sowie die Verwendung hierbei von mehrwandigen Nanoröhren wird in [6] beschrieben.

Die Immobilisierung von Mikrosphären organischer und anorganischer Beschaffenheit auf Substraten wird in der [7] beschrieben.

Wegen des wachsenden Interesses in der Nanoschalttechnik besteht ein Bedürfnis für Nanoröhren mit der Verwendung in der Nanoschalttechnik gerechten elektronischen Eigenschaften.

Somit liegt der Erfindung das Problem zugrunde, solche Nanoröhren anzugeben.

Das Problem wird durch eine mehrwandige Nanoröhre mit einer äußeren Wand und zumindest einer inneren Wand gelöst, bei der nur die äußere Wand oxidiert ist und die zumindest eine innere Wand nicht oxidiert ist.

Eine solche selektive Oxidation nur der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhre bringt insbesondere zwei Vorteile mit sich.

Zum einen lässt sich eine mehrwandige Nanoröhre, bei der lediglich die äußere Wand oxidiert ist, kovalent und damit rutschfest auf einem Substrat binden.

- 5 Zum anderen führt die weitgehende Oxidation lediglich der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre einen elektrisch isolierenden Effekt herbei, so dass die äußere Wand der mehrwandigen Nanoröhre ihre Eigenschaft, den elektrischen Strom zu leiten, verliert.
- 10 Dahingegen übernimmt eine oder mehrere der inneren Nanoröhren der mehrwandigen Nanoröhre die Eigenschaft, den elektrischen Strom zu leiten, weil diese zumindest eine innere Nanoröhre der mehrwandigen Nanoröhre durch die äußere Wand der
- 15 mehrwandigen Nanoröhre von der chemischen Oxidation geschützt wird.
- Ein solches Beibehalten der Leitfähigkeit der zumindest einen inneren Nanoröhre unter Verlust der Leitfähigkeit der äußeren
- 20 Wand der mehrwandigen Nanoröhre ist im Hinblick auf die Konstruktion von Nanoschaltkreisen besonders vorteilhaft, denn eine solche äußere elektrische Isolierung ermöglicht den kreuzweisen Aufbau von solchen Nanoschaltkreisen, ohne dass es zu einem elektrischen Kurzschluss zwischen den sich
- 25 kreuzenden Nanoröhren kommt.

- Es ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass bei der gezielten chemischen Veränderung der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhren die elektrische Leitung durch die
- 30 mehrwandige Nanoröhre automatisch von der nächstinneren Nanoröhre übernommen wird. So wird analog zu einem mit Gummi abgeschirmten elektrischen Draht eine Nanostruktur geschaffen, die sich speziell zu leitenden Zwecken in Nanoschaltkreisen eignet.

35

Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung kann die mehrwandige Nanoröhre beispielsweise eine mehrwandige

Kohlenstoff-Nanoröhre oder eine mit Bornitrid dotierte mehrwandige Nanoröhre sein.

- 5 Erfindungsgemäß wird auch ein Verfahren zum Oxidieren nur der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhre angegeben. Gemäß diesem Verfahren wird zunächst eine mehrwandige Nanoröhre bereitgestellt. Die mehrwandige Nanoröhre wird sodann einer Oxidation unterzogen. Abschließend wird die so behandelte mehrwandige Nanoröhre isoliert.
- 10 Gemäß einem Ausführungsbeispiel des Verfahrens wird als mehrwandige Nanoröhre eine mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhre oder eine mit Bornitrid dotierte mehrwandige Nanoröhre verwendet.
- 15 Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel des Verfahrens erfolgt die Oxidation der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre durch Umsetzung mit einer starken Säure.
- 20 Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel des Verfahrens werden als starke Säure Salpetersäure, Schwefelsäure, Chromsäure, Carosche Säure, Perchlorsäure, Jodsäure oder organischen Persäuren verwendet.
- 25 Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel des Verfahrens wird die Schwefelsäure als eine Mischung mit Wasserstoffperoxid eingesetzt.
- 30 Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel des Verfahrens erfolgt die Oxidation der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre bei Raumtemperatur oder bis zur Siedetemperatur der jeweiligen Reaktionsmischung.
- 35 Ein Substrat weist eine darauf gebundene mehrwandige Nanoröhre auf, bei der nur die äußere Wand oxidiert ist.

Ein elektronisches Bauelement weist ein Substrat auf sowie auf dem Substrat gebundenen mehrwandige Nanoröhren, bei der nur die äußere Wand oxidiert ist.

5 Bei einem Verfahren zum Binden einer mehrwandigen Nanoröhre auf einem Substrat werden in einem ersten Schritt chemisch reaktive Gruppen auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre erzeugt und in einem zweiten Schritt wird die chemisch so modifizierte mehrwandige Nanoröhre mit dem
10 Substrat derart in Kontakt gebracht, dass zwischen den erzeugten chemisch reaktiven Gruppen auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre und dem Substrat kovalente chemische Bindungen entstehen.

15 Das Kohlenstoffgerüst der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre wird durch Erzeugung reaktiver Gruppen derivatisiert. Diese auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre erzeugten chemisch reaktiven Gruppen reagieren anschließend mit auf dem Substrat sich befindlichen Resten,
20 die geeignet sind, mit den chemisch reaktiven Gruppen auf der äußeren Wand der Nanoröhre zu reagieren, sodass eine kovalente Bindung zwischen diesen entsteht.

Als Substrat können Materialien, die solche chemisch reaktive
25 Gruppen aufweisen, verwendet werden. Zum Beispiel weisen Substrate auf Siliziumbasis, zum Beispiel Glas (SiO_2), Hydroxylgruppen auf. Alternativ kann als Substrat ein Material, das solche chemisch reaktive Gruppen nicht aufweist, mit einem weiteren Material beschichtet werden, das
30 solche chemisch reaktiven Gruppen aufweist. Bei dem Substrat sind als chemisch reaktive Gruppen Nukleophile besonders bevorzugt.

Als Derivatisierung der äußeren Wand der mehrwandigen
35 Nanoröhre ist beispielsweise die Oxidation einer großen Zahl sich in dieser Wand befindlichen Kohlenstoffatomen zur Erzeugung chemisch reaktiver Gruppen besonders geeignet.

Ferner kann vor dem Schritt des Inkontaktbringens mit dem Substrat die chemisch so modifizierte mehrwandige Nanoröhre durch Filtration allein oder durch Ausfällung und Filtration abgetrennt werden.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist es vorgesehen, dass nach dem Schritt des Abtrennens aber vor dem Schritt des Inkontaktbringens die chemisch so modifizierte mehrwandige Nanoröhre in einem geeigneten Medium dispergiert wird.

Ferner kann die Erzeugung chemisch reaktiver Gruppen auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre mittels einer Oxidation der äußeren Wand erfolgen, wobei gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung die Oxidation durch Umsetzung mit einer starken oxidierenden Säure erfolgt.

Als starke oxidierende Säure kann Salpetersäure, Schwefelsäure, Chromsäure, Carosche Säure, Perchlorsäure, Jodsäure oder organischen Persäuren verwendet werden.

Weiterhin kann die Schwefelsäure als eine Mischung mit Wasserstoffperoxid eingesetzt werden.

Die Erzeugung chemisch reaktiver Gruppen auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre kann bei Raumtemperatur oder bis zur Siedetemperatur erfolgen.

Weiterhin ist es gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung vorgesehen, dass das Substrat chemisch reaktive Gruppen aufweist, die imstande sind, mit den chemisch reaktiven, auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre erzeugten Gruppen eine kovalente Bindung einzugehen.

Die chemisch reaktiven Gruppen auf dem Substrat können Nukleophile, beispielsweise Hydroxylgruppen sein.

Die auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre erzeugten Gruppen können Carboxylfunktionen sein.

Vor dem Inkontaktbringen können die Carboxylgruppen mit einem
5 Reagenz zur Begünstigung der kovalenten Bindung behandelt werden, wobei als Halogenierungsreagenz im Falle der Säurechloridbildung SOCl_2 , COCl_2 , PCl_3 , PCl_5 , CCl_4 und Ph_3P , PhCOCl , ClCOCOC oder Cl_2CHOMe , und als Kupplungsreagenz bei
10 direktem Umsatz von Säure- und Hydroxylgruppen Carbodiimide oder Mineralsäuren verwendet werden können.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist es vorgesehen, dass für den Fall, dass Thionylchlorid als
15 Halogenierungsreagenz zur Aktivierung der auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre erzeugten Carboxylgruppen verwendet wird, eine Base zusätzlich verwendet wird, um die bei der Reaktion zwischen dem Säurechlorid auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre und den Hydroxylgruppen auf dem Substrat entstehende Chlorwasserstoffsäure zu
20 neutralisieren.

Als Base zur Neutralisation wird gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung bevorzugt eine nicht nukleophile Base verwendet, vorzugsweise ein alkylsubstituiertes Amin wie
25 beispielsweise Triethylamin oder Diisopropylamin, oder Imidazol, Pyridin oder eine Mischung aus Kalium-tert-Butoxid und tert-Butanol.

Zusätzliche Merkmale der Erfindung werden nachfolgend anhand
30 der Ausführungsformen mit Bezugnahme auf die Zeichnung erläutert.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Figuren dargestellt und werden im weiteren näher erläutert.

35

Es zeigen

Figur 1 eine schematische Darstellung des Derivatisierens und des Aufbringens der mehrwandigen Nanoröhre auf dem Substrat gemäß einer Ausführungsform der Erfindung und

5

Figur 2 eine schematische vergrößerte Darstellung einer mit Carboxylgruppen derivatisierten mehrwandigen Nanoröhre mit kovalenten Bindungen mit dem Substrat.

10 Fig.1a zeigt eine mehrwandige Nanoröhre 100 in einem Behälter 103, der ein Medium 110 enthält, vor der Erzeugung chemisch reaktiver Gruppen auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 100.

15 Fig.1b zeigt die Nanoröhre 100 mit chemisch reaktiven Gruppen 102, die durch eine kovalente Bindung 101 auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 100 erzeugt worden sind.

Eine solche Derivatisierung der äußeren Wand der mehrwandigen
20 Nanoröhre 100 erfolgt gemäß diesem Ausführungsbeispiel durch Umsetzung mit starker oxidierender Säure.

Bevorzugt zu diesem Zweck ist beispielsweise die Verwendung von konzentrierter Salpetersäure (bis zu 100
25 Gewichtsprozent), Chromsäure, Carosche Säure, Schwefelsäure, bzw. Gemische aus Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid, Perchlorsäure, Jodsäuren oder organischen Persäuren.

Die Umsetzung kann bei Raumtemperatur oder bei einer
30 Temperatur bis zur Siedehitze der jeweiligen säurehaltigen Medium erfolgen. Durch die Behandlung mit starker oxidierender Säure in wässriger Umgebung werden Kohlenstoffatome auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre in die entsprechenden Carbonsäurereste umgewandelt.

35

Nach der Erzeugung chemisch reaktiver Gruppen 102 auf der Oberfläche der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 100

können die chemisch so modifizierten Nanoröhren 100 wahlweise durch Filtration allein oder durch aufeinanderfolgende Ausfällung und Filtration von dem säurehaltigen Medium 110 abgetrennt werden.

5

Die abgetrennten derivatisierten Nanoröhren 100 können dann wahlweise gewaschen und dann in einem zweiten Medium 104 dispergiert werden oder ohne erstmals gewaschen zu werden, direkt nach dem Abtrennen in einem zweiten Medium 104 dispergiert werden, wie in Fig.1c dargestellt.

10

Das Ergebnis des Dispergierens der chemisch so modifizierten Nanoröhre 100 ist in Fig.1c gezeigt.

15

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann die in Fig.1c in dem Medium 104 dispergierte mehrwandige Nanoröhre 100 mit einem weiteren Reagenz umgesetzt werden, um die auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 100 erzeugten chemisch reaktiven Gruppen 102 gegenüber Reaktion mit einem Nukleophil durch weitere Derivatisierung zu aktivieren. Auf diese Weise wird die spätere Bildung einer kovalenten Bindung mit den vorzugsweise nukleophilen Gruppen auf dem Substrat begünstigt.

20

25

Für den Fall, dass die auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 100 erzeugten Gruppen 102 Carboxylgruppen sind, kann eine solche Aktivierung durch Zugabe eines bekannten Halogenierungsreagenzes wie beispielsweise SOCl_2 , oder für den Fall des direkten Umsatzes der Carboxylgruppen mit Hydroxylgruppen des Substrats eines bekannten Kupplungsreagenzes wie beispielsweise Carbonyldiimidazol, Dicyclohexylcarbodiimid oder Mineralsäuren erfolgen.

30

Alternativ zu SOCl_2 , für die Konvertierung zum entsprechenden Säurechlorid kann auch COCl_2 , PCl_2 , PCl_3 , $(\text{CCl}_4$ und $\text{Ph}_3\text{P})$, PhCOCl , ClCOCOCl oder Cl_2CHOMe verwendet werden.

35

Fig.1d zeigt den Fall, bei dem ein Substrat 106 in einem Substratgehäuse 105 nicht aus einem Material besteht, das chemisch reaktive Gruppen aufweist.

- 5 In diesem Fall werden die chemisch reaktiven Gruppen 107 zunächst auf dem Substrat mittels bekannter Verfahren beispielsweise durch Beschichtung mit einem Material, das chemisch reaktiver Gruppen aufweist, aufgebracht.
- 10 Fig.1e zeigt das Substrat 106 in dem Substratgehäuse 105, bei dem das Substratmaterial entweder bereits chemisch reaktive Gruppen 107 aufweist oder bei dem solche chemisch reaktive Gruppen 107 über die kovalente Bindung 108 auf die Oberfläche des Substrats 106 aufgebracht worden sind.
- 15 In jedem Fall ist die Oberfläche des Substrats 106 vorzugsweise hydrophil, so dass eine gute Haftung der ebenfalls durch die Derivatisierung hydrophil gemachten mehrwandigen Nanoröhre 100 gewährleistet ist.
- 20 Fig.1f zeigt das Inkontaktbringen des die derivatisierten mehrwandigen Nanoröhren 100 enthaltenden Mediums 104 mit dem Substrat 106. Für den Fall, dass Thionylchlorid oder ein anderes halogenierendes Reagenz bei dem in Fig.1c
- 25 dargestellten Schritt zur Aktivierung der auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 100 erzeugten Carboxylgruppen verwendet wurde, kann eine zusätzliche Base bei dem in Fig.1f dargestellten Schritt zugesetzt werden.
- 30 Eine solche Base dient der Neutralisation der Chlorwasserstoffsäure, die bei der Reaktion zwischen den Säurechloridfunktionen auf der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre und den Hydroxylgruppen auf dem Substrat entsteht.
- 35 Somit wird während der Bildung der kovalenten Bindung 109 zwischen der Nanoröhre 100 und dem Substrat 106, bei der Säure entsteht, verhindert, dass die Gegenreaktion, nämlich

die saure Hydrolyse der gebildeten Estergruppe zwischen der Nanoröhre 100 und dem Substrat 106, stattfindet.

Für diesen Zweck werden möglichst nicht nukleophile Basen, beispielsweise alkylsubstituierte Amine wie beispielsweise Triethylamin oder Diisopropylamin, oder alternativ Imidazol, Pyridin oder eine Mischung aus Kalium-tert-Butoxid und tert-Butanol verwendet.

Fig.1g zeigt die kovalente Bindung 109 zwischen der derivatisierten mehrwandigen Nanoröhre 100 und dem Substrat 106.

Die auf diese Weise auf dem Substrat 106 gebundene mehrwandige Nanoröhre 100 bleibt daher rutschfest auf der Oberfläche des Substrats 106. Diese Rutschfestigkeit ermöglicht eine bislang unerzielte Beständigkeit im Aufbau von Nanoschaltkreisen.

Fig.2 zeigt eine schematisierte vergrößerte Darstellung einer mit Carboxylgruppen 203 derivatisierten Nanoröhre 201 beim Inkontaktkommen mit Hydroxylgruppen 204 auf der Oberfläche des Substrats 202.

Bei dieser Ausführungsform sind die Carboxylgruppen 203 der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre 201 nicht mit einem Halogenierungsreagenz modifiziert worden.

Die Bereiche, in denen das Bilden einer Esterbindung zwischen der mehrwandigen Nanoröhre und dem Substrat stattfindet, sind durch Ellipsen 205 hervorgehoben.

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

- 5
- [1] P.M. Ajayan, Nanotubes from Carbon, Chem. Rev. 99,
S. 1787 - 1799, 1999
- 10
- [2] W. Han et al, Synthesis of Boron Nitride Nanotubes From
Carbon Nanotubes by a substitution Reaction, Applied
Physics Letters, Volume 73, Number 21, S. 3085 - 3087,
November 1998
- 15
- [3] R. Martel et al, Single- and Multi-Wall Carbon Nanotube
Field-Effect Transistors, Applied Physics Letters,
Volume 73, Number 17, S. 2447 - 2449, October 1998
- 20
- [4] G.S. Duesberg, W.J. Blau et al., Chemical Physics
Letters 310 (1999) 8-14
- [5] WO 97/32571
- [6] WO 01/03208
- [7] DE 69221826 T2

Patentansprüche

1. Mehrwandige Nanoröhre mit einer äußeren Wand und zumindest einer inneren Wand,
 - 5 • bei der nur die äußere Wand oxidiert ist, und
 - bei der die zumindest eine innere Wand nicht oxidiert ist.
- 10 2. Mehrwandige Nanoröhre gemäß Anspruch 1, bei der die mehrwandige Nanoröhre eine mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhre oder eine mit Bornitrid dotierte mehrwandige Nanoröhre ist.
- 15 3. Verfahren zum Oxidieren nur der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhre,
 - bei dem eine mehrwandige Nanoröhre bereitgestellt wird;
 - bei dem die mehrwandige Nanoröhre einer Oxidation unterzogen wird; und
 - 20 • bei dem die so behandelte mehrwandige Nanoröhre isoliert wird.
- 25 4. Verfahren gemäß Anspruch 3, bei dem als mehrwandige Nanoröhre eine mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhre oder eine mit Bornitrid dotierte mehrwandige Nanoröhre verwendet wird.
- 30 5. Verfahren gemäß Anspruch 3 oder 4, bei dem die Oxidation durch Umsetzung mit einer starken Säure erfolgt.
- 35 6. Verfahren gemäß Anspruch 5, bei dem als starke Säure Salpetersäure, Schwefelsäure, Chromsäure, Carcsche Säure, Perchlorsäure, Jodsäure oder organischen Persäuren verwendet werden.
7. Verfahren gemäß Anspruch 6,

14

bei dem die Schwefelsäure als eine Mischung mit Wasserstoffperoxid eingesetzt wird.

8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 3 bis 7,
5 bei dem die Oxidation der äußeren Wand der mehrwandigen Nanoröhre bei Raumtemperatur oder bis zur Siedetemperatur der jeweiligen Reaktionsmischung erfolgt.

9. Substrat,
10 auf dem eine mehrwandige Nanoröhre gemäß einem der Ansprüche 1 oder 2 gebunden ist.

10. Elektronisches Bauelement,
welches das Substrat gemäß Anspruch 9 aufweist.

15

Zusammenfassung

Mehrwandige Nanoröhre sowie Verfahren zum Oxidieren nur der äußeren Wand einer mehrwandigen Nanoröhre

5

Die Erfindung betrifft eine mehrwandige Nanoröhre mit einer äußeren Wand und zumindest einer inneren Wand, bei der nur die äußere Wand oxidiert ist und die zumindest eine innere Wand nicht oxidiert ist.

10

Sign. Figur 2

[illegible]

Bezugszeichenliste

- 100 Mehrwandige Nanoröhre
- 101 Kovalente Bindung
- 102 Auf der mehrwandigen Nanoröhre aufgebrachte chemisch
reaktive Gruppe
- 103 Behälter
- 104 Zweites Medium
- 105 Substratgehäuse
- 106 Substrat
- 107 Chemisch reaktive Substratgruppe
- 108 Kovalente Bindung
- 109 Kovalente Bindung zwischen der mehrwandigen Nanoröhre und
dem Substrat
- 110 Erstes Medium

- 201 Mehrwandige Nanoröhre
- 202 Substrat
- 203 Auf der mehrwandigen Nanoröhre aufgebrachte
Carboxylgruppe
- 204 Substrathydroxylgruppe
- 205 Veresterungsbereich